

## ⑫ 公開特許公報(A)

昭63-38531

⑬ Int. Cl. 4

C 21 D 9/50  
1/42  
9/08  
11/00

識別記号

1 0 1  
  
1 0 2

庁内整理番号

A-8015-4K  
7518-4K  
D-8015-4K  
7371-4K

⑭ 公開 昭和63年(1988)2月19日

審査請求 未請求 発明の数 2 (全6頁)

⑮ 発明の名称 電縫鋼管溶接部の誘導加熱制御方法

⑯ 特 願 昭61-184064

⑰ 出 願 昭61(1986)8月5日

⑱ 発 明 者 永 沼 洋 一 福岡県北九州市八幡東区枝光1-1-1 新日本製鐵株式  
 ⑱ 発 明 者 有 田 秀 昶 会社八幡製鐵所内  
 ⑱ 発 明 者 元 村 雅 記 神奈川県川崎市中原区井田1618番地 新日本製鐵株式會社  
 ⑱ 発 明 者 角 田 忠 第1技術研究所内  
 ⑱ 発 明 者 角 田 忠 福岡県北九州市八幡東区枝光1-1-1 新日本製鐵株式  
 ⑱ 出 願 人 新日本製鐵株式会社 愛知県東海市東海町5丁目3 新日本製鐵株式會社名古屋  
 ⑱ 代 理 人 弁理士 谷山 輝雄 製鐵所内  
 ⑱ 代 理 人 弁理士 谷山 輝雄 東京都千代田区大手町2丁目6番3号  
 ⑱ 代 理 人 弁理士 谷山 輝雄 外3名

## 明 細 書

## 1. 発明の名称

電縫鋼管溶接部の誘導加熱制御方法

## 2. 特許請求の範囲

1 電縫鋼管の溶接部を誘導加熱コイルにより加熱するにあたり、被加熱鋼管の物性値、寸法、誘導加熱条件および誘導加熱コイル入側の被加熱鋼管の温度の各値を用いて誘導加熱コイル出側の被加熱領域の任意の点の温度を算出する式を予め定めておき、加熱に先立って誘導加熱コイルへの設定電流値を仮設定して前記温度算出式により誘導加熱コイル出側における鋼管被加熱部の管外面および内面の推定温度を算出し、該算出した推定温度と目標温度との偏差が一定範囲内ならば前記仮設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定し、前記温度偏差が一定範囲を超えるときは前記仮設定電流値を修正して推定温度の算出と目標温度との偏差の算出を該温度偏

差が一定範囲内になるまで繰返してこのときの修正設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定することを特徴とする電縫鋼管溶接部の誘導加熱制御方法。

2 電縫鋼管の溶接部を誘導加熱コイルにより加熱するにあたり、被加熱鋼管の物性値、寸法、誘導加熱条件および誘導加熱コイル入側の被加熱鋼管の温度の各値を用いて誘導加熱コイル出側の被加熱領域の任意の点の温度を算出する式を予め定めておき、加熱に先立って誘導加熱コイルへの設定電流値を仮設定して前記温度算出式により誘導加熱コイル出側における鋼管被加熱部の管外面および内面の推定温度を算出し、該算出した推定温度と目標温度との偏差が一定範囲内ならば前記仮設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定し、前記温度偏差が一定範囲を超えるときは前記仮設定電流値を修正して推定温度の算出と目標温度との偏差の算出を該温度偏

の修正設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定し、加熱開始後の誘導加熱コイル出側における鋼管被加熱部の管外面温度の実測値にもとづいて前記温度算出式のなかの係数を学習的に修正することとを特徴とする電撚鋼管溶接部の誘導加熱制御方法。

### 3. 発明の詳細な説明

#### (産業上の利用分野)

本発明は電撚鋼管の溶接部を熱処理するための誘導加熱の制御方法に関する。

#### (従来の技術)

電撚鋼管の製造工程において、溶接部の残留応力を除去し、溶接部の組織を母材なみに改善して溶接部の品質を向上させるために、溶接部を局部的に加熱して焼鈍あるいは焼準することが行われている。

この電撚鋼管溶接部の加熱方式としては誘導加熱方式が一般に用いられており、たとえば特公昭60-32687号公報、特公昭61-3851号公報、特開昭60-116725号公報にあるよう

結晶状態が粗大化して材質が劣化する。

そこで、誘導加熱方式による鋼管溶接部の加熱温度を定められた温度範囲に制御するための方法が従来から提案されており、前述の特公昭60-32687号公報に記載の温度制御方法はその1例である。この方法は、加熱開始前に、鋼管厚さ方向の温度が目標値に維持できる誘導加熱コイルへの印加電圧を算出する演算式を用いて誘導加熱コイルの初期設定を行い、加熱開始後は誘導加熱コイルの出側で検出した鋼管温度にもとづき、上流側の誘導加熱コイルのフィードバック制御および下流側の誘導加熱コイルのフィードフォワード制御を行う方法である。

#### (発明が解決しようとする問題点)

上記方法も含め従来の方法は、加熱開始前の誘導加熱コイルの初期設定のための制御モデルは比較的簡単なものを用い、かつ鋼管の厚さや移送速度、誘導加熱コイルとのギャップ、最終目標温度等の条件が同じものに対してはモデル式の係数などを変えることなく用い、また加熱

に、複数の誘導加熱コイルを鋼管の進行方向に間隔を置いて設置して溶接部を局部的かつ連続的に加熱している。

この場合誘導加熱コイルと被加熱鋼管の位置関係から、被加熱鋼管の外部上面が最も加熱されやすく、従って昇温速度が大きく、これに対して内面の温度は主に上部外面からの熱伝達に依存するため昇温速度は小さい。

また誘導加熱コイルは間隔を置いて設置されているので、被加熱鋼管のある点についての外面と内面の時間的溫度推移は第3図に示すようになる。図において横軸は時刻(経過時間)、縦軸は温度であり、Pは鋼管、 $H_1, \dots, H_n$ は誘導加熱コイルであり、曲線(1)は外面温度、曲線(2)は内面温度の推移を示す。

ところで周知のように、鋼の材質は熱処理時の温度の影響を大きく受け、たとえば鋼管の溶接部の焼鈍においては、溶接部の温度を変態点温度の約750℃以上に均一に加熱する必要があり、また加熱温度が1000℃を超えると鋼の

開始後の実測温度にもとづく修正制御も誘導加熱コイルへの印加電圧を修正するだけでモデル式の係数などを修正することはないので、最終目標温度に対する制御精度が低く、さらに鋼管内面の温度も含めた加熱制御という点では初期設定、修正設定ともに精度的にみて不充分であった。

#### (問題点を解決するための手段)

本発明は上記に鑑み、電撚鋼管溶接部の誘導加熱にあたり、所定の被加熱領域の全域にわたって目標温度範囲内に加熱する高精度の加熱制御方法を提供することを目的とする。

このための本発明方法は、電撚鋼管の溶接部を誘導加熱コイルにより加熱するにあたり、被加熱鋼管の物性値、寸法、誘導加熱条件および誘導加熱コイル入側の被加熱鋼管の温度の各値を用いて誘導加熱コイル出側の被加熱領域の任意の点の温度を算出する式を予め定めておき、加熱に先立って誘導加熱コイルへの設定電流値を仮設定して前記温度算出式により誘導加熱コ

イル出側における鋼管被加熱部の管外面および内面の推定温度を算出し、該算出した推定温度と目標温度との偏差が一定範囲内ならば前記仮設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定し、前記温度偏差が一定範囲を超えるときは前記仮設定電流値を修正して推定温度の算出と目標温度との偏差の算出を該温度偏差が一定範囲内になるまで繰返してこのときの修正設定電流値を誘導加熱コイルの初期電流値として設定すること、およびこれに加えて加熱開始後の誘導加熱コイル出側における鋼管被加熱部の管外面温度の実測値にもとづいて前記温度算出式のなかの係数を学習的に修正することを特徴とする電熱鋼管溶接部の誘導加熱制御方法である。

(作用)

まず本発明における制御モデル式について説明する。

前述した第3図のように鋼管に対して誘導加熱コイルを配置したときの鋼管被加熱部の管厚

き、近似的に次式

$$\delta = K_4 \cdot \sqrt{\mu \cdot \sigma} \quad \dots (3)$$

で表わすことができる。

さらに鋼管被加熱部の管厚さ方向位置  $y$  における管周方向位置  $x$  の誘導電流値  $I_{(x,y)}$  は、近似的に次式

$$I_{(x,y)} = I_0 \cdot e^{-K_5 \cdot x^2} \quad \dots (4)$$

で表わすことができることを本発明者等は実験により確認した。ここで  $K_5$  は鋼管の外径によって定まる係数である。

前記(1)、(2)、(3)、(4)式から求まる鋼管被加熱領域の各点  $(x,y)$  における誘導電流値  $I_{(x,y)}$  と鋼の電導率  $\sigma$  から各点  $(x,y)$  における発熱量  $Q_{(x,y)}$  が次式により求まる。

$$Q_{(x,y)} = I_{(x,y)}^2 / \sigma \quad \dots (5)$$

これから任意の点  $(x,y)$  の任意の時刻  $(t)$  から  $\Delta t$  時間 (たとえば 0.1 秒) 後の温度  $T_{x,y,t+\Delta t}$

さ方向位置  $y$  の誘導電流値  $I_{(y)}$  は近似的に次式

$$I_{(y)} = I_0 \cdot e^{-\delta \cdot y} \quad \dots (1)$$

で表わすことができることを本発明者等は実験により確認した。(1)式中の  $I_0$  は管厚さ方向位置  $y = 0$  すなわち管外表面の誘導電流値であり、この表面誘導電流値  $I_0$  は、誘導加熱コイルの設定電流値を  $I_s$  としたとき、近似的に次式で表わすことができる。

$$I_0 = I_s \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \sqrt{\mu \sigma} \quad \dots (2)$$

ここで  $\mu$  は鋼の比透磁率、 $\sigma$  は鋼の電導率であり、 $K_1$  は設定電流値  $I_s$  によって定まる係数 (後述)、 $K_2$  は誘導加熱コイルの形状、印加電流が磁界に変換される効率および誘導加熱コイルと鋼管とのギャップ等により定まる係数、 $K_3$  は鋼管の厚さ、外径、誘導加熱コイルの励磁周波数によって定まる係数である。また(1)式中の指数  $\delta$  は、 $K_4$  を鋼管の厚さ、外径、誘導加熱コイルの励磁周波数によって定まる係数とすると

は、鋼の熱伝導率を  $\lambda$ 、比熱を  $C$ 、比重を  $\rho$  とするとき、周知の2次元伝熱方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho \cdot C} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} + \frac{Q}{C} \quad \dots (6)$$

を差分近似した次式により求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{T_{x,y,t+\Delta t} - T_{x,y,t}}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho \cdot C_{x,y,t}} \left[ \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{x,y,t} \right. \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{T_{x+1,y,t} - T_{x,y,t}}{\Delta x} - \frac{T_{x,y,t} - T_{x-1,y,t}}{\Delta x} \right) \right\} + \\ &\quad \left. \frac{1}{\Delta y} \left\{ \lambda_{x,y,t} \left( \frac{T_{x,y,t+1} - T_{x,y,t}}{\Delta y} - \frac{T_{x,y,t} - T_{x,y,t-1}}{\Delta y} \right) \right\} \right] \\ &\quad + \frac{Q_{x,y,t}}{C_{x,y,t}} \\ &= \frac{\lambda_{x,y,t}}{\rho \cdot C_{x,y,t}} \left( \frac{T_{x+1,y,t} - 2T_{x,y,t} + T_{x-1,y,t}}{\Delta x^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{T_{x,y,t+1} - 2T_{x,y,t} + T_{x,y,t-1}}{\Delta y^2} \right) + \frac{Q_{x,y,t}}{C_{x,y,t}} \quad \dots (7) \end{aligned}$$

ここで  $x$  および  $y$  は、被加熱部の管周方向および管厚さ方向の位置を示し、(7)式で用いる際の  $x$  および  $y$  の値は、差分計算領域を各々  $\Delta x$  および  $\Delta y$  の微小な一定間隔で格子状に区切った接点の管周方向および管厚さ方向の座標位置を示す値 (1, 2, 3, ...,  $m$ , および 1, 2, 3, ...,  $n$ ) である。

この(7)式は計算速度の高速化をはかるために、つぎのような近似を行って簡略化したものである。すなわち鋼の比重  $\rho$  は本発明の適用温度範囲では温度による変化は大きくないので一定とし、また管周方向の必要計算領域は溶接部中心から 10 mm 程度と狭いので、厳密には円弧状にすべきところを矩形状とした。なお(7)式中、発熱量  $Q_{x,y,t}$  は、誘導加熱中は前記(5)式から求め、誘導加熱コイルの配置されていない区間内では発熱がないので  $Q_{x,y,t} = 0$  とする。

本発明では、このようにして定めた制御モデル式を用いて誘導加熱中の溶接部の所定領域の温度挙動を模擬し、該領域の温度が目標範囲内となるような誘導加熱コイルの設定電流値を算

する偏差制御器、10は電流制御器、11は温度計Dで測定した鋼管外面の実測温度と鋼管外面推定温度を比較してその偏差を設定器2に出力する比較器である。

上記制御系において、まず鋼管Pの被加熱部(溶接部)の初期温度に対応する物性値  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $C$ ,  $\rho$  および係数  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  を設定器1から演算器4に対して設定する。ここで前記初期温度は、誘導加熱コイルHの入側における鋼管溶接部の実測温度の平均値を用いる。係数  $K_2$  は誘導加熱コイルHの形状、効率および鋼管とのギャップにより定まり、係数  $K_3$  および  $K_4$  は鋼管Pの厚さ、外径、誘導加熱コイルの励磁周波数によって定まり、 $K_5$  は鋼管Pの外径によって定まる。一方設定器3で誘導加熱コイルHへの印加電流の仮設定電流値を、たとえば鋼管Pの厚さ区分に応じて予めテーブルとして記憶させてあるなかから選択して設定器2に入力し(このときスイッチSは開状態になっている)、設定器2は仮設定電流値に対応した係数  $K_1$  を演

出して初期設定を行い、さらに実測温度に応じて前記モデル式の係数の修正を行うようにしたものである。

#### (実施例)

以下実施例にもとづきさらに詳細に説明する。

第1図は本発明の実施例における制御系の装置構成を示す図である。

図において1は鋼の物性値  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $C$ ,  $\rho$  および係数  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  を設定する設定器、2は係数  $K_1$  を設定する設定器、3は誘導加熱コイルHへの印加電流を設定する設定器、4は(1)式~(7)式により鋼管Pの被加熱領域の温度を推定する演算器、5は鋼管Pの内面目標温度を設定する設定器、6は鋼管内面目標温度と推定温度を比較してその偏差を出力する比較器、7は鋼管Pの外表面目標温度を設定する設定器、8は鋼管外表面目標温度と推定温度を比較してその偏差を出力する比較器、9は偏差器6, 8の出力に応じてスイッチSを閉にするか、又は開にしておいて設定器3の設定電流値を修正する信号を出力

算器4に対して設定する。

演算器4は(1)式~(7)式を用いて、鋼管Pの長さ方向のある仮想点が誘導加熱コイルによる加熱領域に到達した時から  $\Delta t$  時間経過後の鋼管内面と外面の推定温度を算出する。そしてこの  $\Delta t$  時間後の推定温度に対応した物性値  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $C$  を用いて再び(1)式~(7)式によりさらに  $\Delta t$  時間経過後の鋼管内面と外面の推定温度を算出する。この演算を  $\Delta t$  時間毎に繰返し、誘導加熱コイルHの鋼管長さ方向の長さを  $L$  とし、鋼管の速度を  $V$  とし、演算繰返し回数を  $N$  とするとき、 $t = \frac{L}{V}$  で求めたものの値が  $t \geq N \times \Delta t$  となったときの前記算出温度が誘導加熱コイルH出側の鋼管内面あるいは外面の推定温度である。

演算器4はこのようにして算出した鋼管Pの内面推定温度を比較器6へ出力し、また外面推定温度を比較器8へ出力する。

比較器6, 8はこの推定温度と目標温度との偏差を偏差制御器9に出力する。

偏差制御器9は、比較器8の出力が零または

負でかつ比較器6の出力が予め定められた一定範囲内ならばスイッチ8を開から閉にして設定器3の仮設定電流値を初期設定電流値として電流制御器10に入力する。

比較器6の出力が正すなわち内面推定温度が内面目標温度より大のときは、設定器3の仮設定電流値から予め定めた値を減じて修正設定電流値とし、あるいは比較器8の出力が予め定められた一定範囲より大(または小)のときは、設定器3の仮設定電流値から予め定めた一定値を減じ(または増加し)て修正設定電流値とし、この修正設定電流値に応じた係数 $K_1$ を用いて演算器4により再び誘導加熱コイル出側の鋼管内面と外面の推定温度を算出する。

このような誘導加熱コイル出側の推定温度の算出と目標温度との比較を両者の温度偏差が一定範囲内になるまで繰返した後、スイッチ8を閉にして設定器3の修正設定電流値を初期設定電流値として電流制御器10に入力する。

このようにして誘導加熱コイルHに対する初

誘導加熱コイル入側における鋼管の温度を算出する演算器である。この演算は、前述の(7)式を用い、同式中の $T_{x,y,t}$ に前段の誘導加熱コイル制御系の演算器4の最終出力(スイッチ8を閉にしたときの鋼管Pの内外面の推定温度)を代入し、同式中の $Q_{x,y,t}$ を0(零)として $\Delta t$ 時間毎に温度を計算し、鋼管Pが前段の誘導加熱コイル出側から次段の誘導加熱コイル入側までに要する移動時間経過後の鋼管Pの内外面推定温度を算出し、次段の制御系の演算器4に初期温度として入力する。

第2段以降の制御系における演算で、第1段の制御系における演算と異なるもう1つの点は、前段の鋼管外面実測温度にもとづく前段制御系の係数 $K_1$ のフィードバック的な修正と同時に後段の制御系の係数 $K_1$ もフィードフォワード的に修正し、第2段以降においては今回加熱の鋼管Pに対して修正した $K_1$ を用いて推定温度の算出を行うことである。上記2点のほかは、各段の制御系の演算や設定の方法は同じである。

期電流値が設定され、鋼管Pの加熱が開始される。鋼管Pの加熱中は、温度計Dにより誘導加熱コイルH出側の鋼管外面の温度を測定し、この実測温度と前記外面推定温度を比較器11で比較してその温度偏差を設定器2に出力する。設定器2はこの温度偏差の正負および大きさに応じて、設定電流値に対応する係数 $K_1$ を学習的に修正し、次回に加熱される鋼管に対してはこの修正した係数 $K_1$ を用いて推定温度の計算を行う。

以上は1個の誘導加熱コイルで加熱する場合又は複数個の誘導加熱コイルで加熱するときの第1段の誘導加熱コイルに対する制御方法である。

つぎに複数個の誘導加熱コイルで加熱するときの2段目以降の誘導加熱コイルに対する制御方法を第2図に示す実施例により説明する。

第2図において12は、鋼管Pが前段の誘導加熱コイルを出てから次段の誘導加熱コイルに到達するまでの間の温度変化を演算して次段の

かくして各段における誘導加熱コイルへの印加電流値が最適に設定され、誘導加熱コイル出側の鋼管の温度は、被加熱領域の全域にわたって目標範囲に制御される。

#### (発明の効果)

以上述べたように本発明方法は、電線鋼管溶接部の誘導加熱にあたり、加熱開始前の誘導加熱コイルの初期電流値を設定するための制御モデルとして被加熱領域の任意の点の温度を算出する式を予め定めておき、この温度算出式を用いて算出した被加熱部の管外面および管内面の推定温度が目標温度に対して一定範囲になるまで前記推定温度の計算を繰返して初期電流値を決定するようにしたので、初期電流値を最適に設定することができる。さらに加熱中の実測温度にもとづいて前記温度算出式のなかの係数を修正するようにしたので、次回加熱材に対する初期電流値および下流側の誘導加熱コイルに対する初期電流値をより最適に設定することができる、というすぐれた効果がある。

#### 4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明の実施例における制御系の装置構成を示す図、第2図は多段に配置した誘導加熱コイルに対して本発明を適用した実施例における制御系の装置構成を示す図、第3図は加熱中における鋼管の外面と内面の時間的溫度推移を示す図である。

1, 2, 3, 5, 7 … 設定器、

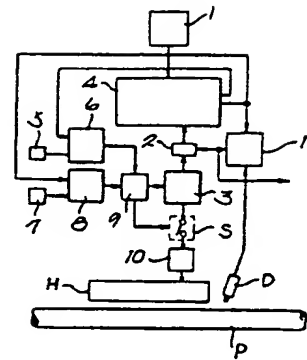
4, 12 … 演算器、 6, 8, 11 … 比較器、

9 … 偏差制御器、 10 … 電流制御器、

8 … スイッチ、 P … 鋼管、

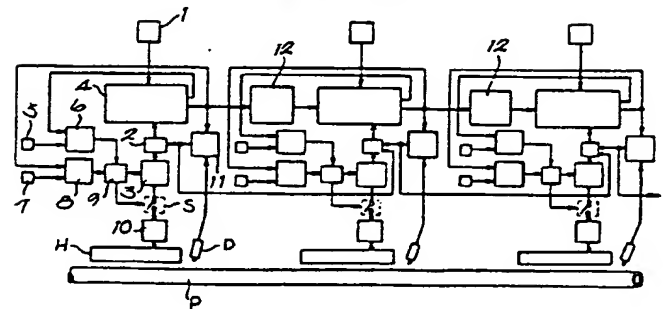
H … 誘導加熱コイル、 D … 溫度計

第 1 図



1, 2, 3, 5, 7: 設定器  
4, 12: 演算器  
6, 8, 11: 比較器  
9: 偏差制御器  
10: 電流制御器  
S: スイッチ  
P: 鋼管  
H: 誘導加熱コイル  
D: 溫度計

第 2 図



第 3 図

